



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 41 34 313 A 1

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 J 5/10
G 01 J 3/12
G 01 M 11/08

②1 Aktenzeichen: P 41 34 313.1
②2 Anmeldetag: 17. 10. 91
④3 Offenlegungstag: 22. 4. 93

DE 4134313 A1 ✓

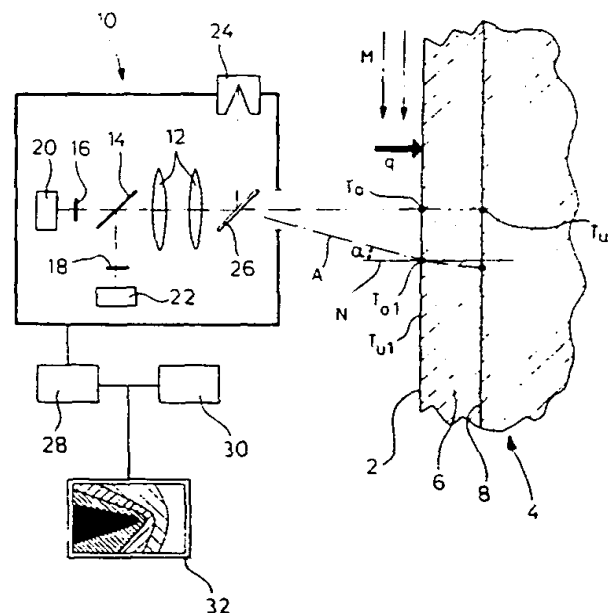
⑦1 Anmelder:
Deutsche Aerospace AG, 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:
Schulze, Bernd, Dipl.-Ing., 8028 Taufkirchen, DE;
Hakenesch, Peter, Dipl.-Ing., 8012 Ottobrunn, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Infrarot-Meßverfahren und -Meßanordnung

⑤7 Um durch eine berührungs- und rückwirkungsfreie Infrarot-Messung sowohl die Oberflächen- wie auch der Innentemperatur (T_o und T_u) eines festen Körpers (4) und hieraus auch bei stationären oder quasi-stationären Temperaturverhältnissen die örtliche Wärmestromdichte an der Oberfläche (2) und den Wärmeübergang bezüglich eines an der Oberfläche entlang strömenden Mediums (M) bestimmen zu können, ist der Körper erfindungsgemäß in einer die Oberfläche bildenden Teilzone (6) spektralselektiv in einem ersten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungsabsorbierend und in einem hiervon abgegrenzten, zweiten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungstransparent, auf der Innenseite (8) der Teilzone, jedoch strahlungsemittierend ausgebildet und für eine in den beiden Wellenlängenbereichen getrennte Messung der von der Körperoberfläche ausgehenden Wärmestrahlung ist ein Zweikanal-Wärmebildgerät (10) vorgesehen, welches eine Recheneinheit (28, 30) zur zeitgleichen Bestimmung der Oberflächentemperatur aus dem Strahlungsenergieanteil im ersten und der Innentemperatur aus dem Strahlungsenergieanteil im zweiten Wellenlängenbereich sowie einen Bildschirm (32) zur visuellen, thermografischen Darstellung der Temperatur- oder der daraus errechneten Wärmestrom- bzw. Wärmeübergangswerte enthält.



DE 4134313 A1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Infrarot-Meßverfahren und eine Infrarot-Meßanordnung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. 4.

Bei bekannten Meßverfahren und -anordnungen, unter anderem auch solchen, die aus Genauigkeitsgründen gleichzeitig in unterschiedlichen Spektralbereichen arbeiten, wird die Temperaturverteilung an der festen Oberfläche eines im konvektiven Wärmeaustausch mit dem Umgebungsmedium stehenden Körpers auf der Basis des Stefan-Boltzmann'schen Strahlungsgesetzes aus der von der Oberfläche emittierten Wärmestrahlung unter Berücksichtigung des Emissionsverhältnisses errechnet, wobei derartige Meßsysteme üblicherweise eine Wärmebildkamera zur Oberflächenabastung und einen zugeordneten Bildschirm zur Grauton- oder Falschfarbendarstellung der Oberflächen-Temperaturverteilung enthalten. Die Feststellung der örtlichen Wärmestromdichte oder der konvektiven Wärmeübergangszahl (Nusselt-Zahl) ist mit den bekannten Meßsystemen jedoch nur bei instationären Wärmeströmungen auf der Grundlage der Fouriergleichungen möglich. Ist die Oberflächentemperatur hingegen zeitlich konstant oder ihre zeitliche Änderung innerhalb der zur Verfügung stehenden Meßdauer sehr klein, wie dies z. B. bei der experimentellen Untersuchung an Modellen von Raumfluggeräten in hypersonischen, intermittierend arbeitenden Hochenthalpie-Windkanälen der Fall ist, so ist man darauf angewiesen, im Inneren des Körpers mit einem definierten Abstand zur Körperoberfläche Temperaturfühler, z. B. Thermoelemente, zu implantieren, um auf diese Weise zusätzlich zur Oberflächentemperatur auch die Innentemperatur des Körpers und hieraus den lokalen Temperaturgradienten zur Ermittlung der örtlichen Wärmestromdichte und des Wärmeübergangs-Kennwertes an der Körperoberfläche bestimmen zu können. Eine solche Meßmethode ist mit einem großen Instrumentierungsaufwand verbunden und auf eine relativ grob gerasterte Meßpunkt-Anordnung beschränkt und führt im allgemeinen wegen der thermischen Störwirkung der Temperaturfühler etwa hinsichtlich des Wärmeleitkoeffizienten, zu einer höchst unerwünschten Verfälschung des Meßergebnisses.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Meßverfahren und eine Meßanordnung der eingangs genannten Art zu schaffen, die auch bei stationären oder sich während der Meßdauer nur minimal ändernden Temperaturverhältnissen eine einfache, berührungs- und rückwirkungsfreie Messung sowohl der Oberflächentemperatur als auch des Temperaturniveaus an einer definierten Innenfläche des Körpers gewährleisten und dadurch eine problemlose Ermittlung des Wärmestroms sowie der konvektiven Wärmeübergangs-Kennwerte an der Körperoberfläche ermöglichen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch das im Patentanspruch 1 gekennzeichnete Meßverfahren bzw. die im Patentanspruch 4 gekennzeichnete Meßanordnung gelöst.

Erfindungsgemäß wird aufgrund der besonderen, strahlungsspezifischen Ausbildung des Körpers in Verbindung mit einem hierauf spektralselektiv abgestimmten Mehrkanal-Meßgerät eine feste Zuordnung der in den einzelnen Infrarot-Wellenlängenbereichen ermittelten Temperaturwerte zu definieren, in Tiefenrichtung gestaffelten Bezugsflächen des Körpers, nämlich der Körperoberflächen und der Innenfläche der transparenten Teilzone, erhalten und dadurch auch bei stationären

oder quasi-stationären Wärmeströmungen eine zuverlässige Bestimmung des Temperaturgradienten gewährleistet, ohne daß hierfür baulich und meßtechnisch problembehaftete Temperatursensoren im Körperinneren angeordnet werden müssen.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Erfindung betrifft die Ermittlung der örtlichen Wärmestromdichte, die gemäß den Ansprüchen 2 und 5 nach Maßgabe der Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Innentemperatur des Körpers bestimmt wird. Im Gegensatz zu den bekannten rückwirkungsfreien Meßsystemen, bei denen der Wärmestrom allein aus den zeitlichen Änderungen der Oberflächentemperatur bestimmt wird, ergibt sich erfindungsgemäß bei Verwendung der Temperaturdifferenz als Bestimmungsgröße für die örtliche Wärmestromdichte der weitere Vorteil, daß der Störeinfluß der Hintergrundstrahlung und der Strahlungsverluste des Körpers weitgehend kompensiert und dadurch der rein durch Wärmeleitung und Konvektion erzeugte Wärmestrom erheblich genauer gemessen werden kann.

Eine weitere, zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung besteht gemäß den Ansprüchen 3 bzw. 6 darin, daß aus dem erfindungsgemäß ermittelten lokalen Temperaturgradienten die örtliche Wärmeübergangs-Kennwerte zwischen der festen Körperoberfläche und einem strömenden Medium errechnet werden, aus denen sich dann — wegen der Ähnlichkeit von Wärmestrom- und hydrodynamischen Strömungsfeldern — die für viele strömungstechnische Anwendungsfälle, etwa bei Flugkörpern, wichtige Grenzschichtdicke des strömenden Mediums im Bereich der Körperoberfläche ergibt.

Gemäß Anspruch 7 schließlich wird zur Oberflächenabastung des Körpers zweckmäßigerweise eine Mehrkanal-Wärmebildkamera mit einem zugeordneten Bildschirm zur visuellen, thermografischen Darstellung der Meßergebnisse, also z. B. der Verteilung des Temperaturgradienten oder der Wärmestromdichte, in Grautönen oder in Falschfarben verwendet.

Die Erfindung wird nunmehr anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezug auf die Zeichnung näher erläutert. Diese zeigt in ihrer einzigen Figur eine erfindungsgemäß ausgebildete Infrarot-Meßanordnung in stark schematisierter Darstellung.

Die gezeigte Infrarot-Meßanordnung dient dazu, durch zeitgleiche Messung zweier, in Wärmestromrichtung q zueinander versetzter Temperaturwerte, T_o und T_u , die Verteilung des örtlichen Temperaturgradienten und hieraus der Wärmestromdichte an der Oberfläche 2 eines mit einem strömenden Medium M in konvektivem Wärmekontakt stehenden Körpers 4, z. B. eines in einem Hochenthalpie-Windkanal einer kurzzeitigen Hyperschallströmung ausgesetzten Flugkörpers, zu ermitteln.

Zu diesem Zweck ist der Körper 4 in einer sich von der Oberfläche 2 bis zum Meßort der Temperatur T_u erstreckenden Teilzone 6 spektralselektiv in einem ersten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungsabsorbierend und in einem hiervon abgegrenzten zweiten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungstransparent ausgebildet; im übrigen werden die physikalischen Eigenschaften des Körpers 4, insbesondere seine Oberflächenbeschaffenheit, seine Wärmeleitfähigkeit und sein Emissionsvermögen, durch die transparente Ausbildung der Teilzone 6 nicht verändert.

Hierdurch wird für die von der Oberfläche 2 ausgehende Wärmestrahlung eine feste Zuordnung zwischen dem Wellenlängenbereich und dem Emissionsort er-

reicht, dergestalt, daß die Strahlungsenergieanteile im ersten Wellenlängenbereich der festen Oberfläche 2 und die Energieanteile im zweiten Wellenlängenbereich der die Bezugsfläche für die Temperatur T_u bildenden Innenfläche 8 des Körpers 4 entstammen.

Für die Oberflächenschicht 6 kommen zahlreiche Materialien in Betracht, beispielsweise Glas mit einer Schichtdicke von 1 bis 2 mm, das eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 1 W/mK und im Wellenlängenbereich zwischen 0,5 und 2,0 μm einen Transmissionsgrad von ca. 0,9 und im Wellenlängenbereich zwischen 5 und 6 μm einen Absorptionsgrad von nahezu 1 besitzt.

Die Oberfläche 2 wird über einen einzigen optischen Weg gleichzeitig in beiden Wellenlängenbereichen mit Hilfe eines spektralselektiv auf die Teilzone 6 abgestimmten Zweikanal-Wärmebildgerätes 10 abgetastet. Dieses enthält ein optisches Linsensystem 12 zur Fokussierung des Infrarot-Strahlenbündels, sowie einen nachgeschalteten, halbdurchlässigen Spiegel 14 zur Aufspaltung des Strahlenbündels in zwei Teilbündel, die jeweils nach Passieren eines optischen Filters 16 bzw. 18 auf einen Infrarotdetektor 20 bzw. 22 auftreffen. Die beiden Filter 16 und 18 besitzen unterschiedliche, auf die spektralselektiven Materialeigenschaften der Teilzone 6 des Körpers 4 abgestimmte Spektralbereiche, so daß die Wärmestrahlung der im Bildfeld des Bildgeräts 10 liegenden Oberfläche 2 von beiden Detektoren 20 und 22 simultan, aber jeweils im ersten und im zweiten Wellenlängenbereich getrennt erfaßt wird. Als Detektoren 20, 22 sind jeweils thermische Detektoren oder für schnelle Vorgänge stickstoffgekühlte Quantendetektoren vorgesehen, die nach Art von Bildsensoren als Detektormosaik ausgebildet sind und im jeweiligen Wellenlängenbereich unter Berücksichtigung des Emissionsverhältnisses der Ober- bzw. Innenfläche 2 bzw. 8 des Körpers 4 mit Hilfe eines Schwarzkörperstrahlers 24 geeicht werden, welcher über einen beweglichen Spiegel 26 in den Strahlengang eingeblendet wird. Hierdurch wird für jedes Element der Detektormosaik 20 und 22 eine Eichkurve der Temperatur als Funktion der auftretenden Strahlungsintensität erhalten.

Auf diese Weise werden durch das Wärmebildgerät 10 die Temperaturen auf der Oberfläche 2 (über den Detektor 20) und gleichzeitig an der Innenfläche 8 des Körpers 4 (über den Detektor 22) gemessen. Dabei ist zu beachten, daß die Temperatur-Meßpunkte T_{o1} und T_{u1} eines unter dem Winkel α schräg zur Oberflächennormalen N geneigten Wärmestrahls A nicht auf der Flächennormalen N liegen, sondern gegenüber dieser unter Berücksichtigung der Strahlenbrechung an der Oberfläche 2 seitlich zueinander versetzt sind. Um dennoch bezüglich der Flächennormalen deckungsgleiche Temperaturbilder zu erhalten, wird die Verteilung des Neigungswinkels α und der entsprechende seitliche Meßpunkt-Versatz in einer Recheneinheit 28 abgelegt, in der die jeweils von den Detektorelementen der Detektormosaik 20 und 22 gelieferten Meßsignale hinsichtlich flächennormaler Temperaturwertpaare T_o T_u korreliert werden.

Aus den so erhaltenen Ober- und Innenflächen-Temperaturwerten wird gleichzeitig in einer zusätzlichen Rechenstufe 30 die örtliche Wärmestromdichte in der Teilzone 6 errechnet und zwar unter Einbeziehung der Wärmeleitfähigkeit und der Schichtdicke der Teilzone 6, wobei die Schichtdicke entweder fest vorgegeben ist oder während der Oberflächenabtastung etwa im Wege einer Interferenzmessung, z. B. der vom Körper 4 ausgehenden Wärmestrahlung, ermittelt wird. Aus der

Wärmestromdichte lassen sich in der Rechenstufe 30 die örtliche Wärmeübergangs-Kennwerte für die konvektive Wärmeübertragung zwischen dem strömenden Medium M und der Oberfläche 2 bestimmen.

Auf einem Bildschirm 32 werden wahlweise die Ober- und Innenflächen-Temperaturverteilung oder der Verlauf der Temperaturdifferenz, $T_o - T_u$, bzw. des Temperaturgradienten an der Oberfläche 2, oder die Verteilung der örtlichen Wärmestromdichte oder der Wärmeübergangskennwerte in visueller, thermografischer Form in Grautonwerten oder Falschfarben dargestellt. Die Bilder können über eine Video-Schnittstelle aufgezeichnet werden.

Patentansprüche

1. Infrarot-Meßverfahren zur berührungslosen, rückwirkungsfreien Ermittlung des Temperaturniveaus eines mittels Wärmeleitung wärmedurchströmten Körpers, bei dem die von der Körperoberfläche ausgehende Infrarot-Strahlung gemessen und hieraus unter Berücksichtigung des Emissionsverhältnisses die Oberflächentemperatur bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, daß der Körper in einer die Oberfläche bildenden Teilzone spektralselektiv in einem ersten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungsabsorbierend und in einem hiervon abgegrenzten, zweiten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungstransparent, auf der Innenseite der Teilzone jedoch strahlungsemittierend ausgebildet, die von der Oberfläche ausgehende Strahlungsenergie im ersten und im zweiten Wellenlängenbereich jeweils getrennt gemessen und die Oberflächentemperatur nach Maßgabe des Energieanteils im ersten und die Temperatur auf der Innenseite der oberflächenbildenden Teilzone nach Maßgabe des Energieanteils im zweiten Wellenlängenbereich bestimmt wird.

2. Meßverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Energieanteile im ersten und im zweiten Wellenlängenbereich zeitgleich gemessen und mit den hieraus ermittelten Temperaturwerten sowie der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke der oberflächenbildende Teilzone die örtliche Wärmestromdichte des Körpers bestimmt wird.

3. Meßverfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Wärmestrom im Körper durch eine konvektive Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium und der festen Körperoberfläche erzeugt und der örtliche Wärmeübergangs-Kennwert nach Maßgabe der Wärmestromdichte an der Körperoberfläche bestimmt wird.

4. Infrarot-Meßanordnung zur Ermittlung der Oberflächen- und der Innentemperatur eines mittels Wärmeleitung wärmedurchströmten Körpers, dadurch gekennzeichnet, daß

der Körper (4) eine die Körperoberfläche 2 bildende, spektralselektive, in einem ersten Infrarot-Wellenlängenbereich strahlungsabsorbierende und in einem hiervon abgegrenzten, zweiten Wellenlängenbereich strahlungstransparente Teilzone (6) besitzt und an der Innenfläche (8) der Teilzone im zweiten Wellenlängenbereich strahlungsemittierend ausgebildet ist, und ein die von der Körperoberfläche ausgehende Wärmestrahlung getrennt in den beiden Wellenlängenbereichen ermittelndes Mehrkanal-Meßgerät (10) zur Bestimmung der

Oberflächentemperatur (T_o) aus dem Strahlungsenergieanteil im ersten und der Innenflächentemperatur (T_u) aus dem Strahlungsenergieanteil im zweiten Wellenlängenbereich vorgesehen ist.

5. Meßanordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß

das Meßgerät (10) zur zeitgleichen Ermittlung der Oberflächen- und der Innenflächentemperatur (T_o , T_u) des Körpers (4) ausgebildet und an eine Recheneinheit (28, 30) zur Berechnung der Wärmestromdichte des Körpers in Abhängigkeit von den örtlichen Ober- und Innenflächen-Temperaturwerten sowie der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit der oberflächenbildenden Teilzone (6) angeschlossen ist.

6. Meßanordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Recheneinheit (28, 30) bei einer konvektiven Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium (M) und der festen Körperoberfläche (2) eine die örtlichen Wärmeübergangswerte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte an der Körperoberfläche ermittelnde Rechenstufe (30) zugeordnet ist.

7. Meßanordnung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß als Meßgerät (10) eine Mehrkanal-Wärmebildkamera mit einer in den beiden Wellenlängenbereichen getrennten Abtastung der im Kamera-Bildfeld liegenden Körperoberfläche (2) und ein zugeordnetes Bildwiedergabegerät (32) zur bildpunktanalogen, visuellen Darstellung der für die einzelnen Bildfeldpunkte der Kamera ermittelten thermischen Kennwerte vorgesehen sind.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

